

**В. А. Твердохвалов**, ст. науч. сотр., e-mail: tverdohvalov@meta.ua

**Н. А. Кудрявченко**, ст. науч. сотр.

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## Неразрушающий контроль твердости чугунных мелющих тел

*Рассмотрен неразрушающий метод контроля и сортировки по твердости чугунных мелющих тел, основанный на связи между твердостью и остаточной локальной намагниченностью литого изделия.*

**Ключевые слова:** контроль твердости, мелющие тела, остаточная локальная намагниченность.

**И**змелчение сырья и материалов широко применяется в различных отраслях промышленности (горнорудной, цементной, энергетической и пр.). Мелющие тела используют более 50 крупных предприятий Украины, и их годовая потребность составляет 180–200 тысяч тонн в год (по данным ООО «Завод «Энергостил», Украина). Одной из основных статей в себестоимости сырья являются затраты на мелющие тела.

Процесс измельчения сырья проходит, как правило, в три стадии, при этом на стадии истирания используют чугунные мелющие тела.

К материалу мелющих тел предъявляется ряд требований, обусловленных спецификой их эксплуатации. Мелющие тела должны иметь высокую твердость, абразивную износостойкость и сопротивляться ударным нагрузкам. На эксплуатационную стойкость также оказывает влияние форма мелющего тела: предпочтение отдают эллиптическим и параболическим формам.

Мелющие тела изготавливают из стали или чугуна [1]. Стальные высокоуглеродистые мелющие тела получают ковкой и прокаткой. Термическая обработка, без которой невозможно получить высокий уровень свойств стали, существенно удорожает стоимость мелющих тел.

Чугунные мелющие тела получают литьем в металлические кокилы для обеспечения высокой скорости охлаждения. При литье получают готовое изделие, не требующее механической обработки. Подбором оптимального состава чугуна и скорости охлаждения при затвердевании можно получить сквозной отбел (что обеспечит высокую твердость) и удовлетворительную ударостойкость, и износостойкость отливки в литом состоянии.

Рекомендованные составы чугунов для изготовления мелющих тел приведены в табл. 1.

Износостойкость возрастает с повышением твердости, поэтому последнюю используют как показатель качества отливок.

Для контроля качества и пригодности к использованию произведенной продукции, от каждой партии изделий отбирают 10 образцов, которые подвергаются проверке по геометрическим размерам, затем определяют их твердость согласно ГОСТ 9013-59 (Метод измерения твердости по Роквеллу). Измерение твердости по Роквеллу – один из прямых методов измерения твердости, основанных на измерении локальной деформации материала испытываемого образца, в зависимости от величины, прилагаемой к индентору нагрузки.

Прямые методы измерения твердости [3], обладая определенными преимуществами перед другими методами механических испытаний, имеют свои недостатки и ограничения, обусловленные необходимостью подготовки изделия к испытаниям, громоздкостью крепления образца, использованием специальной силовой аппаратуры нагружения, нестабильностью размеров отпечатка и др. В связи с этим все большее значение приобретают косвенные методы неразрушающего контроля твердости, основанные на корреляционных связях между режимами литья, фазовым составом, структурой, твердостью и физическими свойствами исследуемых изделий.

Среди методов неразрушающего контроля все большее использование находит предложенный Ф. Ферстером метод контроля поверхностных дефектов в стальном прокате по анализу магнитных полей рассеяния в зоне локального намагничивания поверхности изделия. При полюсном локальном

Таблица 1

### Химический состав чугуна для изготовления мелющих тел, %мас. [2]

Чугун	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	P	S
нелегированный	2,8–3,6	0,6–1,4	не более 1,0	–	–	–	0,30	0,30
низколегированный	3,0–3,4	0,6–1,0	0,3–0,7	0,5–0,9	0,1	0,4	0,08	0,14
среднелегированный	3,2–3,8	0,6–1,2	0,4–1,5	1,6–2,2	0,3	0,2–0,5	0,10	0,15

намагничивании напряженность остаточного магнитного поля пропорциональна коэрцитивной силе сплава, то есть не зависит от формы и размеров детали, и носит универсальный характер для оценки твердости и структурного состояния изделия [4].

Для сортировки по твердости чугуновых мелющих тел простым, надежным и удобным может быть неразрушающий метод контроля, основанный на связи между твердостью и остаточной локальной намагниченностью литого изделия.

Суть предложенного метода заключается в кратковременном контакте полюса постоянного магнита с поверхностью контролируемого изделия и последующим измерением составляющих поля остаточной локальной намагниченности над намагниченным участком изделия.

На основании этих принципов в ФТИМС НАН Украины разработан прибор «Ферротест» (рис. 1), который позволяет проводить контроль таких показателей качества литых изделий как: твердость деталей, глубина поверхностно упрочненных слоев, однородность структуры в различных зонах детали.

Работа прибора основана на измерении интенсивности полей рассеивания над локально намагниченными точками на поверхности контролируемого изделия. Устройство полюсного намагничивания прибора конструктивно совмещено с магнитометрическим датчиком, размеры которого обеспечивают доступ к различным зонам изделия. Использование современных постоянных магнитов в приборе позволяет обеспечить глубину намагничивания порядка 4–6 мм. В сравнении с методом измерения твердости по Роквеллу, в котором глубина внедрения индентора (при твердости 40–50 HRC) составляет 0,1–0,13 мм, величина остаточной локальной намагниченности характеризует твердость большего объема материала, чем величина HRC, что позволяет контролировать твердость как на поверхности, так и внутри мелющих тел.

Для подтверждения возможностей метода исследованы структура, твердость и магнитные характеристики мелющих тел ТЗ типа эллипсоидов, полученных из нелегированного чугуна (2,8–3,6 % С; 0,6–1,4 % Si; ≤ 1,0 % Mn; 0,3 % P; 0,3 % S) литьем в кокиль, сортируемых по твердости на три группы:

- I ≤ 415 HV (43,8 HRC);
- II – 415-520 HV (43,8-53 HRC);
- III ≥ 520 HV (53 HRC).

В табл. 2 приведены результаты измерений характерных по твердости мелющих тел, при этом замеры выполнены как на литой, так и на зачищенной наждачным кругом поверхности.

На рис. 2 приведены результаты графической обработки данных табл. 2, которые свидетельствуют, что росту значения остаточной локальной намагниченности соответствует рост твердости мелющих тел. Анализ данных показывает, что разброс значений остаточной локальной намагниченности



Рис. 1. Внешний вид прибора «Ферротест»

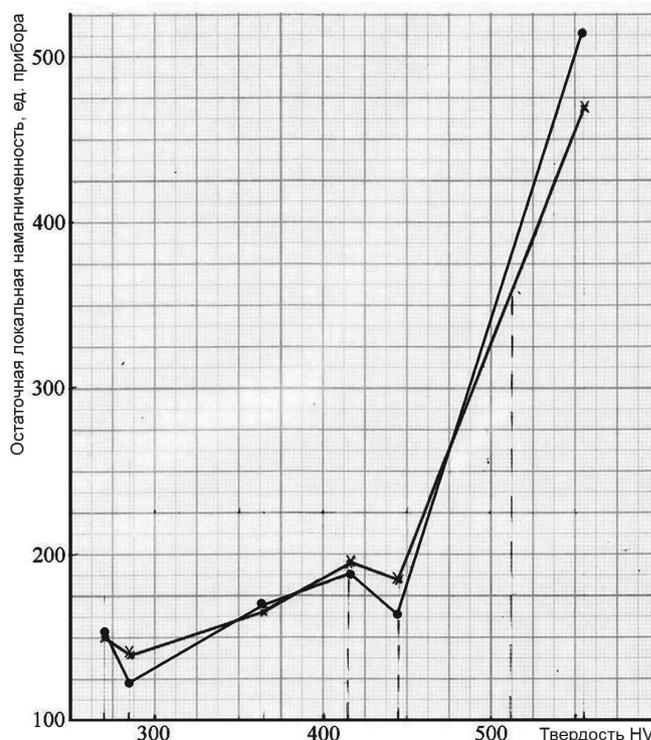


Рис. 2. Зависимость остаточной локальной намагниченности от твердости мелющих тел: ● – литая поверхность; \* – зачищенная поверхность

Таблица 2

**Твердость и остаточная локальная намагниченность чугуновых мелющих тел**

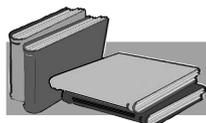
№ Образца	Твердость, HV	Остаточная локальная намагниченность $H_r^N$		Примечание
		Литая поверхность	Зачищенная поверхность	
1	555	514	471	белый чугун
2	415	182	197	белый чугун
3	285	120	140	есть графит
4	444	166	187	белый чугун
5	363	168	166	есть графит
6	269	152	150	есть графит

$\pm 10$  ед. соответствует разброс значений твердости  $\pm 1-2$  ед.  $HV$  (для мелющих тел 1 группы), а с увеличением абсолютного значения твердости  $HV$  свыше 450 этот разброс уменьшается, то есть показания стабилизируются в узком интервале измеряемых величин.

Можно отметить и особенность этой зависимости – провалы в значениях некоторых образцов, имеющих высокую твердость (400–420  $HV$ ), возможно, это связано со случайным появлением в этих чугунах междендритного точечного графита из-за колебаний содержания кремния в сплаве, что не сказывается на механической характеристике – твердости, но отра-

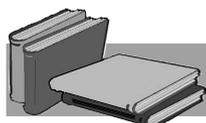
жается на магнитной характеристике. По-видимому, магнитная характеристика является более структурно-чувствительной характеристикой, чем твердость, поскольку лучше отражает способность мелющих тел к разрушению.

Таким образом, рассмотренный метод позволяет проводить оперативную оценку твердости по измерениям остаточной локальной намагниченности, а задав на приборе «Ферротест» допустимые отклонения, можно проводить сортировку готовых изделий по группам твердости. Небольшие габариты датчика позволяют легко и быстро проводить выборочный контроль качества.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Несвижский О. А. Производство мелющих тел для шаровых мельниц. – М.: Машгиз, 1961. – 151 с.
2. Тіла молотні литі з чавуну. Технічні умови. ТУ У 28.7-26524137-1344:2006 – [Чинний від 2006–04–13]. – Київ: Держспоживстандарт України, 2006.
3. Гудков А. А., Славский Ю. И. Методы измерения твердости металлов и сплавов. – М.: Metallurgy, 1982. – 168 с.
4. Förster F. Theoretische und experimentelle Grundlagen der elektromagnetischen Qualitätsortierung von stahlteilen. IV Restfeldverfahren. Zeitschrift für Metallkunde, 1954. – Bd. 45. – S. 223–238.



## REFERENCES

1. Nesvizhsky O. A. (1961). Proizvodstvo meliushchikh tel dlia sharovykh mel'nits [Production of grinding bodies for ball mills]. Moscow: Mashgiz, 151 p. [in Russian].
2. TU U 28.7-26524137-1344: 2006. Tila molol'ni lyti z chavunu. Tekhnichni umovy [Grinding bodies molted from cast iron. Specifications]. Effective from 2006-04-13. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2006 [in Ukrainian].
3. Gudkov A. A., Slavsky Yu. I. (1982). Metody izmereniia tverdosti metallov i splavov [Methods for measuring the hardness of metals and alloys]. Moscow: Metallurgy, 168 p. [in Russian].
4. Förster F. (1954). Theoretische und experimentelle Grundlagen der elektromagnetischen Qualitätsortierung von stahlteilen. IV Restfeldverfahren. Zeitschrift für Metallkunde, Bd. 45, S. 223–238 [in German].

### Анотація

*Твердохвалов В. О., Кудрявченко М. О.*

Неруйнівний контроль твердості чавунних мелючих тіл

*Розглянуто неруйнівний метод контролю та сортування за твердістю чавунних мелючих тіл, що заснований на зв'язку між твердістю та залишковою локальною намагніченістю литого виробу.*

### Ключові слова

*Контроль твердості, мелючі тіла, залишкова локальна намагніченість.*

### Summary

*Tverdokhvalov V., Kudriavchenko N.*

Non-destructive control of hardness of cast-iron grinding bodies

*A non-destructive method of control and sorting by hardness of cast-iron grinding bodies based on the relation between hardness and residual local magnetization of a cast product is considered.*

### Keywords

*Control of hardness, grinding bodies, residual local magnetization.*

Поступила 25.10.17